

贵州金鼎山下寒武统黑色岩系的有机地球化学特征

易发成, 杨 剑, 陈兴长, 刘岁海

(西南科技大学 非金属矿研究所, 四川 绵阳 621002)

摘 要: 对贵州遵义金鼎山下寒武统牛蹄塘组黑色岩系的氯仿沥青“A”及族组分做了成分检测, 并进行了岩石氯仿抽提物中饱和烃气相色谱分析。结果表明, 黑色岩系属生油岩, 且为腐泥型和混合型生油岩, 以腐泥型为主; 黑色岩系有机质丰度高, 有机质主要来源于海生低等菌、藻类生物; 黑色岩系姥姘烷与植烷比值、岩性和生物特征指示其形成于一种缺氧还原沉积环境。

关键词: 黑色岩系; 有机地球化学; 缺氧环境; 下寒武统; 贵州省

中图分类号: P588. 2; P593

文献标识码: A

文章编号: 1000- 6524 (2005) 04- 0294- 07

Organic geochemical characteristics of Lower Cambrian black shales in Jindingshan, Guizhou Province

YI Fa_cheng, YANG Jian, CHEN Xing_chang and LIU Sui_hai

(Institute of Nonmetallic Minerals, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621002, China)

Abstract: This paper deals with the formation conditions of black shales on the basis of analyzing such items as the component of chloroform bitumen “A” and the gas_facies chromatogram of saturated hydrocarbon. Studies show that the Lower Cambrian black shales in Jindingshan of Guizhou Province are sapropelic type and mixed type oil_forming rocks. The black shales are characterized by high content of organic matters, and the organic sources are algae and fungi. Organic geochemical features indicate that black shales were formed in an anoxic sea environment.

Key words: black shales; organic geochemistry; anoxic environment; Lower Cambrian; Guizhou Province

黑色岩系是一套以富含有机质为特征的海相细粒沉积岩的总称(范德廉等, 1973; 高振敏等, 1997; 吴朝东等, 1999a)。黑色岩系是多种元素(如铂族元素 PGE、稀土元素 REE、Au、Ag、Ni、Mo、Cu、Pb、Zn、Se、V、U、Tl、Cd 等)的重要载体, 其中常产出石煤、重晶石、磷、多金属等许多大型、超大型矿床。矿化黑色岩系的经济意义越来越受到重视。许多国家都开展了与黑色岩系有关成矿作用及其经济潜力的研究(王登红, 1997)。近年来, 学者们对黑色岩系进行了广泛的研究, 取得了不少成果。Coveney 和 Nansheng(1991)研究了黑色岩系富 Ni、Mo、PGE、Au 矿

床。叶杰和范德廉(1994, 2000)对辽宁瓦房子铁锰矿床做了研究, 并综述了黑色岩系型矿床的形成作用及产出特征。李胜荣等(1995, 2000, 2002)探讨了黑色岩系稀土元素、铂族元素的来源及成因。肖启云和李胜荣(2002)对矿化黑色岩系中元素的表生迁移和环境效应做了研究。Singh 等(1999)研究了黑色岩系的 Re、Os 同位素。Bernhard Peucker Ehrenbrink 和 Hannigan(2000)探讨了黑色岩系 Re、PGE 的迁移规律。Chu 等(2001)研究了黑色岩系铂族元素地球化学特征。Mao 等(2001)对贵州遵义黑色岩系 Ni、Mo、PGE 矿床做了 Re、Os 同位素测定, 并论述

收稿日期: 2004-09-07; 修订日期: 2005-03-21

基金项目: 四川省教育厅资助项目

作者简介: 易发成(1959-), 男, 教授, 博士, 从事地球化学的教学与科研工作。

了其地质学和地球化学特征。陈华勇和张增杰(2001)就综合利用黑色岩系中矿产资源阐述了自己的看法。另外,张光弟等(2002)对贵州遵义黑色岩系铂族金属富集模式,黄占起等(2002)对内蒙古狼山—渣尔泰山地区黑色岩系铂族元素矿床找矿前景,鲍正襄等(2002)对上扬子台区黑色岩系钒矿床进行了研究。有关黑色岩系有机地球化学的研究,在探讨有机质与黑色岩系成岩成矿作用的关系方面具有重要意义。Coveney 等(1992)探讨了华南黑色岩系含铂 Mo₂Ni 矿床与有机质的关系。Murowchick 等(1994)对华南寒武系底部 Ni₂Mo₂(PGE₂Au) 矿床硫同位素做了研究。雷加锦等(2000a, 2000b)研究了川湘皖黑色岩系形态硫特征和磷结核特征。吴朝东等(1999a, 1999b, 1999c, 1999d)对湘西黑色岩系有机地球化学做了研究。胡凯等(1995)研究了赣桂湘碳质岩系层控金矿的有机地球化学特征。温汉捷等(2000)对川陕湘下寒武统高硒地层(黑色岩系)的有机地球化学特征及生物标志物进行了研究。华南黑色岩系有机地球化学研究在湖南做得较多,本文

对贵州黑色岩系的研究可弥补这方面的不足,通过研究黔北下寒武统黑色岩系的有机地球化学特征,来评价黑色岩系的成岩成矿环境。

1 地质背景

研究区早寒武世的古地理环境是在震旦纪的基础上发展起来的,属扬子陆棚海与江南边缘海的过渡地带(李胜荣等, 1995)。在震旦纪南沱冰期以后,冰川消融,海平面上升,扬子海侵扩大,形成了广泛分布于我国南方的下寒武统黑色岩系。岩石类型主要是硅质岩、磷块岩、碳质页岩、粉砂岩、石煤、重晶石岩、碳酸盐岩等。研究区的寒武系,在项礼文(1981)所划分的 10 个一级地层区中属扬子区与江南区的过渡地区。

2 样品采集及测试分析

本研究的样品采自贵州遵义金鼎山下寒武统牛蹄塘组黑色岩系剖面,剖面位置见图 1。该剖面露头

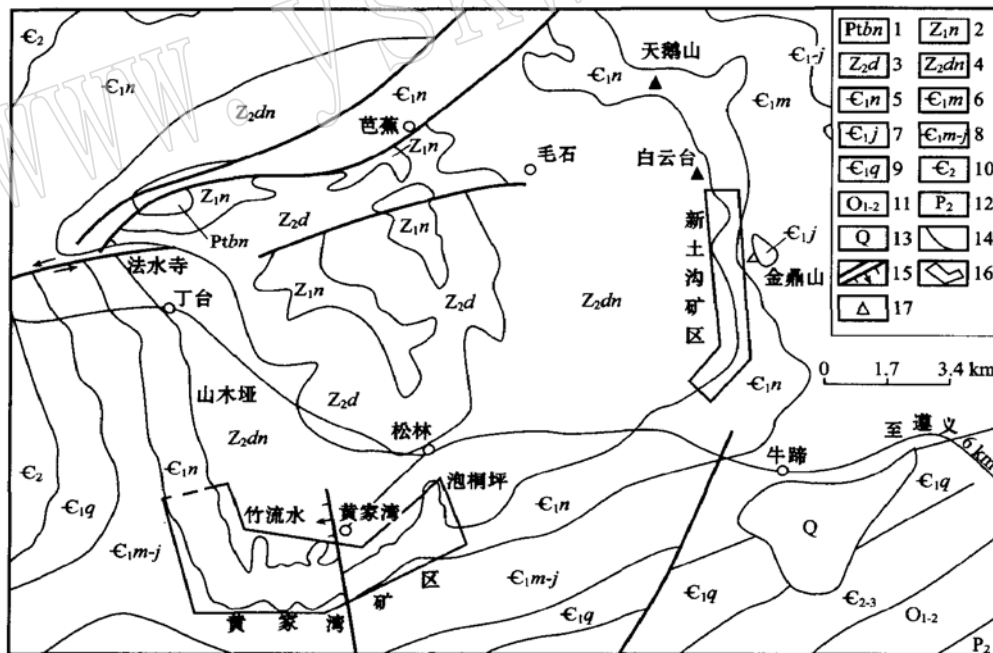


图 1 贵州金鼎山下寒武统黑色岩系分布区地质略图[据张光弟等(2002)略修改]

Fig. 1 Diagrammatic geological map of Lower Cambrian black shales in Jindingshan, Guizhou Province (modified from Zhang Guangdi *et al.*, 2002)

- 1—上元古界; 2—南沱组; 3—陡山沱组; 4—灯影组; 5—牛蹄塘组; 6—明心寺组; 7—金顶山组; 8—明心寺组与金顶山组并层; 9—清虚洞组;
- 10—中寒武统; 11—中、下奥陶统; 12—上二叠统; 13—第四系; 14—地层界线; 15—断层; 16—Ni₂Mo₂PGE 矿区; 17—采样位置
- 1—Upper Proterozoic; 2—Nantuo Formation; 3—Doushantuo Formation; 4—Dengying Formation; 5—Niutitang Formation; 6—Mingxinsi Formation; 7—Jindingshan Formation; 8—combined strata of Mingxinsi Formation and Jindingshan Formation; 9—Qingxudong formation;
- 10—Middle Cambrian; 11—Middle and Lower Ordovician; 12—Upper Permian; 13—Quaternary; 14—stratigraphic boundary;
- 15—fault; 16—Ni₂Mo₂PGE ore district; 17—sampling site

清楚,层序完整。黑色岩系的底界(下伏地层)为震旦系顶部灯影组白云岩,二者为平行不整合接触关系;顶界(上覆地层)以牛蹄塘组灰色含白云岩透镜体伊利石页岩出现为标志,其间为整合接触。岩序自下而上由5个岩性段组成,即黑色硅质岩(下硅质层)、磷块岩(磷矿层)、多元素富集层(镍矿层和钼矿层)、黑色条纹状炭泥质硅质岩(上硅质层)、黑色炭质伊利石页岩。各岩石的矿物成分为:白云岩除主要矿物碳酸盐矿物(白云石和方解石)外,还有伊利石和石英;硅质岩的主要矿物为石英,次要矿物有重晶石、钾长石、伊利石、绿泥石等;磷块岩的主要矿物为磷灰石和石英,其次为绿磷铁矿、绿磷锰矿,含少量纤锌矿;富镍-钼金属层的主要硫化物矿物有黄铁矿、闪锌矿、毒砂、辉钼矿、针镍矿、砷镍矿、辉砷镍矿、辉铜矿、黄铜矿、方铅矿等,其他矿物有斧石、方解石、伊利石、石英、褐铁矿等;黑色页岩的主要矿物为石英、伊利石,有少量黄铁矿。本研究采集了震旦系灯影组白云岩、寒武系牛蹄塘组磷块岩(磷矿层)、金属富集层之镍矿层和钼矿层、黑色页岩等岩石样品,具体采样位置见图2。

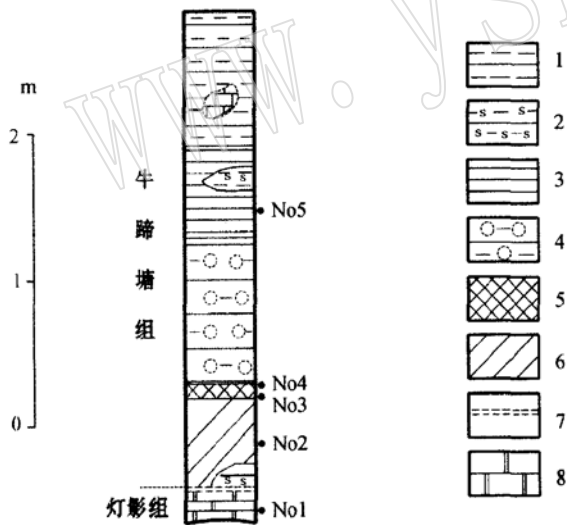


图2 贵州金鼎山下寒武统黑色岩系剖面采样位置图
Fig. 2 Sampling sites along the section of Lower Cambrian black shales in Jindingshan, Guizhou Province

岩性柱据李胜荣^①,略修改;1—厚层状炭质伊利石页岩;2—硅质岩;3—薄层状炭质伊利石页岩;4—富金属磷结核层;5—多金属元素富集层;6—磷块岩;7—风化褐铁矿岩;8—白云岩
1—thick bedded carbonaceous illite shale; 2—siliceous rock;
3—thin bedded carbonaceous illite shale; 4—metalliferous phosphatic nodule bed; 5—polymetallic bed; 6—phosphorite;
7—weathered limonite; 8—dolomite

样品的测试分析在四川石油管理局地质勘探开发研究院地质实验室进行。氯仿沥青“A”及族组分的检测设备是天平,其检测环境为:温度24℃,湿度60% RH。岩石氯仿抽提物中饱和烃气相色谱分析的设备是HP6890气相色谱仪,其检测环境为:温度20℃,湿度68% RH。

3 结果与讨论

3.1 氯仿沥青“A”及族组分分析

氯仿沥青“A”是用氯仿从岩样中抽提出的有机物质,其族组分包括饱和烃、芳香烃、非烃、沥青质等。测定结果见表1。

氯仿沥青“A”是评价生油岩有机质丰度的基础指标之一。所测样品中,只有钼矿层氯仿沥青“A”含量达0.1478%(>0.1%),具有良好的生油岩标志,其余样品氯仿沥青“A”含量都较低(<0.1%)。氯仿沥青“A”族组成中,饱和烃>非烃>沥青质>芳香烃。在氯仿沥青中,饱和烃含量为27.87%~55.19%,平均达40.22%;非烃含量为11.85%~30.42%,平均24.33%;沥青质含量为5.46%~17.92%,平均为12.22%;芳香烃含量为4.53%~15.00%,平均为10.41%。可见,黑色岩系都具有高饱和烃、低芳烃和高非烃的族组分分布特征,表现出以富含类脂化合物和蛋白质为特点的低等水生生物来源的腐泥型有机质的特点(温汉捷等,2000)。钼矿层的氯仿沥青“A”族组成总量(饱和烃+芳香烃+非烃+沥青质)最低(62.02%),其他3个样品差别不大(磷块岩97.92%,镍矿层90.97%,黑色页岩97.81%)。各样品总烃(饱和烃与芳香烃之和)含量为磷块岩49.58%、镍矿层55.49%、钼矿层32.40%、黑色页岩65.03%,即分别为495 800、554 900、32 400、650 300×10⁻⁶。尚慧芸等(1990)对我国中、新生代沉积盆地生油岩的总烃含量统计表明,好生油岩的总烃含量为1 000×10⁻⁶左右,较好生油岩>500×10⁻⁶,非生油岩<100×10⁻⁶。从这点看,贵州黑色岩系均属好生油岩,其中黑色页岩最好,依次变差的为镍矿层、磷块岩、钼矿层。黑色岩系有机碳测定结果(自下而上)为磷块岩2.44%、镍矿层0.90%、钼矿层9.29%、黑色页岩5.29%,得到相应的总烃/有机碳值为20.32、61.66、3.488、12.29。总烃与有机

① 李胜荣. 1994. 湘黔地区下寒武统黑色岩系金铂族元素地球化学研究. 中国科学院地球化学研究所博士后论文. 1~118.

表 1 贵州金鼎山下寒武统黑色岩系氯仿沥青“ A ”及族组成

w_B/ %

Table 1 Group composition and contents of chloroform bitumen “ A ” in Lower Cambrian black shales in Jindingshan of Guizhou Province

序号	样品号	岩性	C _{org}	氯仿沥青	族组成			
					饱和烃	芳香烃	非烃	沥青质
4	No5	黑色页岩	5.29	0.018 3	55.19(56.426)	9.84(10.060)	27.32(27.932)	5.46(5.582)
3	No4	钼矿层	9.29	0.147 8	27.87(44.937)	4.53(7.304)	11.85(19.107)	17.77(28.652)
2	No3	镍矿层	0.90	0.008 4	43.23(47.521)	12.26(13.477)	27.74(30.494)	7.74(8.508)
1	No2	磷块岩	2.44	0.012 7	34.58(35.314)	15.00(15.319)	30.42(31.066)	17.92(18.301)

测试者: 四川石油管理局地质勘探开发研究院地质实验室王菊生; C_{org}为样品有机碳含量; 括号内数字为该组分占族组成总量的质量分数。

碳的比值越高, 有机质转化成烃类越多, 是好生油岩。该比值表明, 镍矿层的生油性最好, 磷块岩和黑色页岩次之, 钼矿层最差。据研究, 煤及煤系地层的芳香烃大于饱和烃, 腐泥型生油岩的饱和烃/芳香烃大于 3, 腐殖型生油岩该比值为 0.5~0.08, 混合型生油岩介于腐泥型与腐殖型之间(尚慧芸等, 1990)。贵州黑色岩系剖面饱和烃/芳香烃自下而上为磷块岩 2.31、镍矿层 3.53、钼矿层 6.15、黑色页岩 5.61, 为非煤及煤系地层, 属于腐泥型和混合型生油岩。具体来说, 钼矿层、黑色页岩和镍矿层属腐泥型, 磷块岩属混合型。将饱和烃、芳香烃、非烃和沥青质做成氯仿沥青“ A ”族组分三角图(图 3), 岩石有机质组分接近原油区为较好生油岩。若远离原油区为差生油层(尚慧芸等, 1990)。贵州黑色岩系中一个样投在 I_A 区, 一个样靠近 I_A 区, 一个样靠近 I_B 区, 一个样投在 II_A 区, 表明其为腐泥型和混合型生油岩, 以腐泥型为主。另外, 对该地黑色岩系干酪根显微组分鉴定, 绝大部分为腐泥组, 其平均含量达 87.5%, 干酪根类型为 I 型, 即腐泥型, 与前面结果基本一致。

3.2 岩石氯仿抽提物中饱和烃气相色谱分析

气相色谱分析方法是在近几十年来迅速发展起来的一种先进的分离分析技术, 在石油化工、环境检测、医药卫生等领域得到了广泛的应用。本次对贵州金鼎山黑色岩系样品氯仿抽提物中饱和烃的气相色谱分析结果见表 2。

黑色岩系中饱和烃的碳数范围在 C₁₁~C₃₇ 内, 其主峰碳为 C₂₆、C₂₇。主峰碳的分布与原始母质性质有关。以藻类为主的有机质表现为低碳数主峰特点, 其主峰碳位于 C₁₅~C₂₁, 如绿藻 nC₁₇ 占优势, 褐藻 nC₁₅ 占优势(Clark and Blumer, 1967); 以高等植物为主的有机质表现为高碳数主峰特点, 主峰碳则为 C₂₅~C₂₉。研究区下寒武统黑色岩系的有机质主要

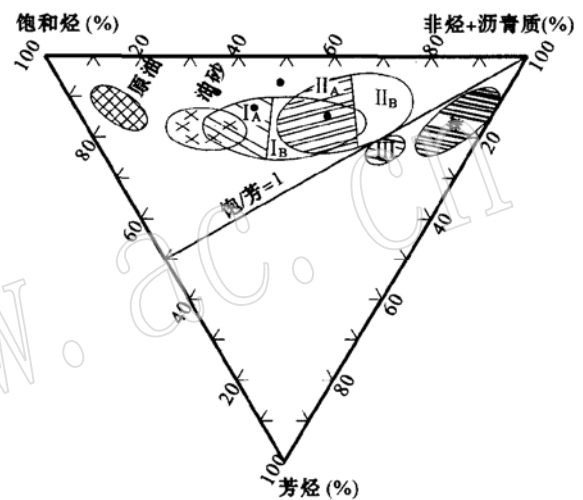


图 3 贵州金鼎山下寒武统黑色岩系氯仿沥青“ A ”族组分三角图(据尚慧芸等, 1990)

Fig. 3 Triangle diagram of chloroform bitumen “ A ” composition of Lower Cambrian black shales in Jindingshan, Guizhou Province

I_A—腐泥型生油岩; I_B—腐殖-腐泥型生油岩; II_A—腐泥-腐殖型生油岩; II_B—腐殖型生油岩; III—腐煤型生油岩
I_A—sapropel type oil-producing rock; II_A—sapropel-humus type oil-producing rock; II_B—humus type oil-producing rock; III—rotten coal type oil-producing rock

来源于菌、藻类(吴朝东等, 1999a, 1999b, 1999c), 并非陆源高等植物。 $\sum nC_{21}^- / \sum nC_{22}^+$ 值分别为磷块岩 0.06、镍矿层 0.11、钼矿层 0.02、黑色页岩 0.09, 即饱和烃轻组分(轻烃)和重组分(重烃)之比均较小, 这与某些低等浮游生物(包括细菌和藻类)的该值一般均大于 1(温汉捷等, 2000)有矛盾。(nC₂₁+nC₂₂)/(nC₂₈+nC₂₉) 值可作为鉴别海相和陆相生油岩指标, 以富含陆源有机质的生油岩和原油该比值为 0.6~1.2, 以海洋有机质为主的生油岩和原油该

表2 贵州金鼎山下寒武统黑色岩系饱和烃气相色谱分析结果

Table 2 Gas_facies chromatogram of saturated hydrocarbon of Jindingshan Lower Cambrian black shales, Guizhou Province

样品号	No2	No3	No4	No5
样品类别	岩石抽提物	岩石抽提物	岩石抽提物	岩石抽提物
岩性	磷块岩	镍矿层	钼矿层	黑色页岩
主峰碳	C27	C27	C27	C26
nC ₁₁	0.01	0.03	0.00	0.04
nC ₁₂	0.09	0.26	0.01	0.23
nC ₁₃	0.14	0.52	0.03	0.42
nC ₁₄	0.14	0.47	0.04	0.35
nC ₁₅	0.23	0.55	0.06	0.48
nC ₁₆	0.74	1.62	0.17	1.17
nC ₁₇	0.98	1.93	0.28	1.54
nC ₁₈	0.91	1.68	0.32	1.27
nC ₁₉	0.71	1.20	0.26	0.85
nC ₂₀	0.62	0.99	0.28	0.84
nC ₂₁	0.87	1.05	0.55	1.34
nC ₂₂	1.98	1.65	1.87	2.62
nC ₂₃	5.17	3.84	5.38	6.26
nC ₂₄	8.50	5.50	8.63	9.44
nC ₂₅	12.24	9.21	12.34	14.50
nC ₂₆	13.64	9.59	12.23	15.60
nC ₂₇	13.87	11.29	12.90	14.94
nC ₂₈	10.49	9.54	10.68	10.41
nC ₂₉	8.75	8.94	9.78	7.66
nC ₃₀	6.65	7.02	7.16	4.18
nC ₃₁	5.16	6.44	5.72	2.49
nC ₃₂	2.90	4.50	3.63	1.22
nC ₃₃	2.07	3.73	2.74	0.79
nC ₃₄	1.42	2.84	1.89	0.89
nC ₃₅	1.09	2.41	1.38	0.17
nC ₃₆	0.37	1.62	0.97	0.17
nC ₃₇	0.27	1.58	0.69	0.12
OEP	1.08	1.12	1.09	1.04
(nC ₂₁ +nC ₂₂)/(nC ₂₈ +nC ₂₉)	0.15	0.15	0.12	0.22
ΣnC ₂₁ ⁻ /ΣnC ₂₂ ⁺	0.06	0.11	0.02	0.09
Pr/nC ₁₇	0.36	0.46	0.55	0.39
Ph/nC ₁₈	0.48	0.57	0.41	0.55
Pr/Ph	0.80	0.92	1.18	0.86

测试者:四川石油管理局地质勘探开发研究院地质实验室苟学敏。

比值为1.5~5.0(尚慧芸等,1990)。海相成油母质多为藻类,富含类脂化合物,其色谱分析碳数分布低碳成分多。本区黑色岩系的(nC₂₁+nC₂₂)/(nC₂₈+nC₂₉)值为磷块岩0.15、镍矿层0.15、钼矿层0.12、黑色页岩0.22,该比值均较小。黑色岩系高主峰碳、较小的ΣnC₂₁⁻/ΣnC₂₂⁺值和(nC₂₁+nC₂₂)/(nC₂₈+nC₂₉)值,可能与成岩后期作用有关。对研究区下寒武统黑色岩系而言,参与成岩成矿的有机质主要来源于菌藻类等低等生物,但也有部分高等植物的加

入(成岩后期),致使样品的轻烃组分减少、重烃组分增加,造成高主峰碳、ΣnC₂₁⁻/ΣnC₂₂⁺值和(nC₂₁+nC₂₂)/(nC₂₈+nC₂₉)值较小的非正常情况出现。OEP是生油岩成熟度指标之一,近代沉积物具有明显的奇偶优势(一般为2.4~5.5),古代沉积物OEP值为0.9~2.4,而原油小于1.2(尚慧芸等,1990)。黑色岩系各岩样OEP分别为磷块岩1.08、镍矿层1.12、钼矿层1.09、黑色页岩1.04,说明奇偶优势接近于1,无奇偶优势或具有微弱的奇偶优势,表明有机质主要来源于低等菌藻类生物。生物标志化合物可用于研究母质性质及成烃演化作用。本次检测出的生物标志化合物除正构烷烃外,还有类异戊二烯烃的姥姣烷(Pr)和植烷(Ph)。Pr/nC₁₇值为磷块岩0.36、镍矿层0.46、钼矿层0.55、黑色页岩0.39;Ph/nC₁₈值分别为0.48、0.57、0.41、0.55;Pr/Ph为磷块岩0.80、镍矿层0.92、钼矿层1.18、黑色页岩0.86。一般认为Pr/Ph<1是指示缺氧还原沉积环境,而Pr/Ph>1则是氧化条件(温汉捷等,2000; Volkman and Maxwell, 1986; 王红梅等,2000)。这里磷块岩、镍矿层和黑色页岩的Pr/Ph值<1,只有钼矿层的大于1,但并非说明钼矿层沉积阶段就是氧化环境,因结合岩性、生物等特征,该阶段仍为典型还原环境。可见,贵州黑色岩系形成时期均为还原沉积环境。

4 结论

(1) 氯仿沥青“A”及族组分分析结果表明,贵州下寒武统黑色岩系有机质丰度高,属生油岩,且为腐泥型和混合型生油岩,以腐泥型为主。生油岩的确认,对判定岩石有机质成熟度、重建古地温和热历史具有十分重要的意义。

(2) 黑色岩系氯仿抽提物中饱和烃气相色谱分析结果表明,其有关指标均与当时沉积环境条件有所差异,可能是后期成岩作用造成的。黑色岩系有机质主要来源于海生低等的菌藻类生物,可能混入部分高等植物。

(3) 根据姥姣烷与植烷比值,结合岩性和生物特征,指示黑色岩系形成于一种缺氧还原沉积环境。

References

Bao Zhengxiang, Wan Rongjiang and Bao Juemin. 2002. Vanadium de-

- posits of black shale in upper Yangtze platform[J]. *Yunnan Geology*, 21 (2): 175~ 182(in Chinese).
- Bernhard Peucker_Ehrenbrink and Hannigan R E. 2000. Effects of black shale weathering on the mobility of rhenium and platinum group elements[J]. *Geology*, 28 (5): 475~ 478.
- Chen Huayong and Zhang Zengjie. 2001. The multipurpose use of mineral resource of black shale in the northwest Hunan[J]. *Geology and Prospecting*, 37 (3): 32~ 35 (in Chinese with English abstract).
- Chu X L, Sun M and Zhou M F. 2001. The platinum_group element geochemistry in chemical geodynamics[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 17 (1): 1 212~ 1 229.
- Clark R C and Blumer M. 1967. Distribution of n_poraffines in marine organisms and sediment[J]. *Limnol Oceanogr*, 12: 79~ 87.
- Coveney R M and Nansheng C. 1991. Ni_Mo_PGE_Au_rich ores in Chinese black shales and speculations on possible analogues in the United States[J]. *Mineralium Deposita*, 26 (2): 83~ 88.
- Coveney R M, Murowchick J B, Grauch R I, *et al.* 1992. Field relations, origins, and resource implications for platinumiferous Molybdenum_Nickel ores in black shales of south China[J]. *Explor. Mining Geol.*, 1 (1): 21~ 28.
- Fan Delian, Yang Xiuzhen, Wang Lianfang, *et al.* 1973. Petrological and geochemical characteristics of a Ni_Mo multi_element_bearing Lower Cambrian black shale from a certain district[J]. *Geochimica*, 3: 143~ 163 (in Chinese with English abstract).
- Gao Zhenmin, Luo Taiyi and Li Shengrong. 1997. The origin of metal-enriched layer in the black rock series[J]. *Geology-Geochemistry*, 1: 18~ 23 (in Chinese with English abstract).
- Hu Kai, Liu Yingjun, Wang Henian, *et al.* 1995. The origin and organic geochemistry characteristics of gold despoits in carbonic rock series, south of China [J]. *Science in China (Series B)*, 25 (10): 1 099~ 1 107 (in Chinese).
- Huang Zhanqi, Shen Cunli and Wang Shouguang. 2002. Ore prospects of platinum_group element deposits hosted in black shales in the Langshan-Zha'ertaishan area, Inner Mongolia[J]. *Geological Bulletin of China*, 21 (10): 663~ 667 (in Chinese with English abstract).
- Lei Jiajin, Li Renwei, Tobschall H J, *et al.* 2000a. The origin and sulphur characteristics of Early Cambrian black shales on the south fringe of Yangtze platform[J]. *Science in China (Series D)*, 30 (6): 592~ 601 (in Chinese).
- Lei Jiajin, Li Renwei and Cao Jie. 2000b. The characteristics of black shale-hosted concretionary phosphates and the mechanisms of microbes mediated phosphorus precipitation in Cambrian horizon on Yangtze platform[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 35 (3): 277~ 287 (in Chinese with English abstract).
- Li Shengrong and Gao Zhenmin. 1995. REE characteristics of black rock series of the Lower Cambrian Niutitang Formation in Hunan - Guizhou province, China, with a discussion on the REE patterns in marine hydrothermal sediments[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 15 (2): 225~ 229 (in Chinese with English abstract).
- Li Shengrong and Gao Zhenmin. 2000. Source tracing of noble metal elements in black shales of the Cambrian bottom in Hunan and Guizhou province[J]. *Science in China (Series D)*, 30 (2): 169~ 174 (in Chinese with English abstract).
- Li Shengrong, Xiao Qiyun, Shen Junfeng, *et al.* 2002. Source of PGE and Re_Os isotopes restriction of ore age in the Lower Cambrian black shale series in Hunan and Guizhou province[J]. *Science in China (Series D)*, 32 (7): 568~ 575 (in Chinese).
- Mao J W, Zhang G D and Du A D. 2001. Geology, geochemistry and Re_Os isotopic dating of the Huangjiawan Ni_Mo_PGE deposit, Zunyi, Guizhou province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 75 (2): 234~ 243.
- Murowchick J B, Coveney R M, Grauch R I, *et al.* 1994. Cyclic variations of sulfur isotopes in Cambrian stratabound Ni_Mo_(PGE_Au) ores of southern China[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58 (7): 1 813~ 1 823.
- Shang Huiyun, Li Jingchao and Guo Shunling. 1990. Organic Geochemistry and Fluorescent Microscope Technology[M]. Beijing: The Petroleum Industry Press, 1~ 287 (in Chinese).
- Singh S K, Trivedi J R and Krishnaswami S. 1999. Re_Os isotope systematics in black shales from the Lesser Himalaya: Their chronology and role in the $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ evolution of seawater[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63 (16): 2 381~ 2 392.
- Volkman J K and Maxwell J R. 1986. Acyclic isoprenoids as biological makers[A]. Jones R B. *Biological Makers in the Sedimentary Record*[C]. New York: Elsevier Publishers, 1~ 42.
- Wang Denghong. 1997. Advance in the study of mineral deposits associated with black shales[J]. *Geology-Geochemistry*, 2: 85~ 88 (in Chinese with English abstract).
- Wang Hongmei, Zhang Wenhui, Xie Shucheng, *et al.* 2000. The organic geochemistry characteristics of Jinya gold deposit, Guangxi [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 16 (4): 602~ 608 (in Chinese with English abstract).
- Wen Hanjie, Qiu Yuzhuo, Yao Linbo, *et al.* 2000. The organic geochemistry characteristics of some Lower Cambrian Se-rich steata in China and their biomarkers' study[J]. *Geochimica*, 29 (1): 28~ 34 (in Chinese with English abstract).
- Wu Chaodong, Chen Qiyong and Lei Jiajin. 1999c. The genesis factors and organic petrology of black shale series from the upper Sinian to the Lower Cambrian, southwest of China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 15 (3): 453~ 462 (in Chinese with English abstract).
- Wu Chaodong, Yang Chengyun and Chen Qiyong. 1999a. The origin and geochemical characteristics of Upper Sinian - Lower Cambrian black shales in western Hunan[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 18 (1): 26~ 38 (in Chinese with English abstract).
- Wu Chaodong, Yang Chengyun and Chen Qiyong. 1999d. The hydrothermal sedimentary genesis of barite deposits in west Hunan and east Guizhou [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 35 (6): 1~ 12 (in Chinese with English abstract).
- Wu Chaodong, Zeng Fangang, Lei Jiajin, *et al.* 1999b. The origin of Lower Cambrian black shales in western Hunan, with the methods of sulphur species and isotopic analysis[J]. *Science Bulletin of China*

- na, 44 (6): 1~ 5 (in Chinese).
- Xiang Liwen. 1981. Stratigraphy of China(No. 4): The Cambrian System of China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~ 210 (in Chinese).
- Xiao Qiyun and Li Shengrong. 2002. The surface transportation of elements and the environmental effect of the Lower Cambrian mineralized black shales in Hunan- Guizhou region[J]. Haidian University Journal, 59 (3): 44~ 52 (in Chinese with English abstract).
- Ye Jie and Fan Delian. 1994. Trace elements Characteristics of Fe-Mn ore deposits in Wafangzi, Liaoning Province[A]. Opening Laboratory of Ore Deposits and Geochemistry, Institute of Geochemistry Chinese Academy of Sciences. Study of Ore Deposits and Geochemistry [C]. Beijing: Earthquake Press, 80~ 82 (in Chinese).
- Ye Jie and Fan Delian. 2000. Characteristics and mineralization of ore deposits related to black shale series[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 19 (2): 95~ 102 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Guangdi, Li Jiuling, Xiong Qun Yao, et al. 2002. Enrichment features and patterns of PGE metals in black shale from Zunyi area, Guizhou province[J]. Mineral Deposits, 21 (4): 377~ 386 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 鲍正襄, 万榕江, 包觉敏. 2002. 上扬子台区下寒武统黑色岩系中的钒矿床[J]. 云南地质, 21(2): 175~ 182.
- 陈华勇, 张增杰. 2001. 湘西北黑色岩系中矿产资源的综合利用[J]. 地质与勘探, 37(3): 32~ 35.
- 范德康, 杨秀珍, 王连芳, 等. 1973. 某地下寒武统含镍铜多元素黑色岩系的岩石学及地球化学特点[J]. 地球化学, 3: 143~ 163.
- 高振敏, 罗泰义, 李胜荣. 1997. 黑色岩系中贵金属富集层的成因: 来自固定铵的佐证[J]. 地质地球化学, 1: 18~ 23.
- 胡凯, 刘英俊, 王鹤年, 等. 1995. 华南碳质岩系层控金矿的有机地球化学特征和成因[J]. 中国科学(B辑), 25(10): 1 099~ 1 107.
- 黄占起, 沈存利, 王守光. 2002. 内蒙古狼山-渣尔泰山地区与黑色岩系有关的铂族元素矿床找矿前景[J]. 地质通报, 21(10): 663~ 667.
- 雷加锦, 李任伟, 曹杰. 2000b. 上扬子区早寒武世黑色页岩磷结核特征及生化淀磷机制[J]. 地质科学, 35(3): 277~ 287.
- 雷加锦, 李任伟, Tobschall H J, 等. 2000a. 扬子地台南缘早寒武世黑色岩系中形态硫特征及成因意义[J]. 中国科学(D辑), 30(6): 592~ 601.
- 李胜荣, 高振敏. 1995. 湘黔地区牛蹄塘组黑色岩系稀土特征——兼论海相热水沉积岩稀土模式[J]. 矿物学报, 15(2): 225~ 229.
- 李胜荣, 高振敏. 2000. 湘黔寒武系底部黑色岩系贵金属元素来源示踪[J]. 中国科学(D辑), 30(2): 169~ 174.
- 李胜荣, 肖启云, 申俊峰, 等. 2002. 湘黔下寒武统铂族元素来源与矿化年龄的Re-Os同位素制约[J]. 中国科学(D辑), 32(7): 568~ 575.
- 尚慧芸, 李晋超, 郭舜玲. 1990. 有机地球化学和荧光显微镜技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 1~ 287.
- 王登红. 1997. 与黑色岩系有关矿床研究进展[J]. 地质地球化学, 2: 85~ 88.
- 王红梅, 张文淮, 谢树成, 等. 2000. 广西金牙金矿床的有机地球化学特征[J]. 岩石学报, 16(4): 602~ 608.
- 温汉捷, 裘愉卓, 姚林波, 等. 2000. 中国若干下寒武统高硒地层的有机地球化学特征及生物标志物研究[J]. 地球化学, 29(1): 28~ 34.
- 吴朝东, 陈其英, 雷家锦. 1999c. 湘西震旦-寒武纪黑色岩系的有机岩石学特征及其形成条件[J]. 岩石学报, 15(3): 454~ 462.
- 吴朝东, 杨承运, 陈其英. 1999a. 湘西黑色岩系地球化学特征和成因意义[J]. 岩石矿物学杂志, 18(1): 26~ 38.
- 吴朝东, 杨承运, 陈其英. 1999d. 新晃贡溪-天柱大河边重晶石矿床热水沉积成因探讨[J]. 北京大学学报(自然科学版), 35(6): 1~ 12.
- 吴朝东, 曾凡刚, 雷家锦, 等. 1999b. 湘西黑色页岩多种形态硫的分离与同位素指示意义[J]. 科学通报, 44(6): 1~ 5.
- 项礼文. 1981. 中国地层(4): 中国的寒武系[J]. 北京: 地质出版社, 1~ 210.
- 肖启云, 李胜荣. 2002. 湘黔下寒武统矿化黑色岩系中元素的表生迁移和环境效应[J]. 海淀走读大学学报, 59(3): 44~ 52.
- 叶杰, 范德康. 1994. 辽宁瓦房子铁锰矿床微量元素特征[A]. 中国科学院地球化学研究所矿床地球化学开放研究实验室. 矿床地球化学研究[C]. 北京: 地震出版社, 80~ 82.
- 叶杰, 范德康. 2000. 黑色岩系型矿床的形成作用及其在我国的产出特征[J]. 矿物岩石地球化学通报, 19(2): 95~ 102.
- 张光弟, 李九玲, 熊群尧, 等. 2002. 贵州遵义黑色页岩铂族金属富集特点及富集模式[J]. 矿床地质, 21(4): 377~ 386.